

УДК 621.314.2

А.С. Плехов<sup>1</sup>, М.Н. Охотников<sup>2</sup>, В.Г. Титов<sup>3</sup>

## ТЕХНОЛОГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

ООО «Энергосбережение»<sup>1</sup>,ООО «Развитие»<sup>2</sup>,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>3</sup>

На примерах использования компенсационного выпрямителя в звене постоянного тока частотно управляемого электропривода обсуждаются комплексные технические решения для предприятий промышленности и жилищно-коммунального хозяйства. Для демонстрации и оценки прогнозируемых результатов инноваций в указанной предметной области предлагается информационный подход на базе дескриптивного моделирования процессов производства, использующего предлагаемые энергосберегающие системы электрооборудования.

*Ключевые слова:* частотно управляемый электропривод, звено постоянного тока, реактивная мощность, компенсация реактивной мощности, компенсационный выпрямитель, раздельное управление группами вентиля, автономный инвертор тока, широтно-импульсное управление, производительная функция электрооборудования, балансовая модель электрооборудования.

В настоящее время производители все чаще стремятся продвинуться на рынке за счет освоения новых технологий. Ни одна страна мира не обеспечивает себя технологиями полностью. Более того, для любой страны объемы импортируемых технологий больше, чем объемы собственных. Для России, находящейся в настоящий момент на стадии заимствования в развитых странах стандартов потребления, объемы технологий, разрабатываемых ею самой, существенно меньше, чем объемы технологий, которые она должна закупать для нормального развития или хотя бы для обеспечения восприимчивости к мировым достижениям. Это в значительной степени предопределяет слабый интерес бизнеса, в том числе и российского, к российским технологиям, особенно в связи с частым отсутствием комплексных решений.

В ответ на этот вызов авторы предлагают комплексное решение - технологию энергосбережения, основанную на компенсации реактивной мощности и на ее дополнительной генерации при условии наличия в данный момент резервов в части установленной мощности электрооборудования.

Поскольку двигатель не всегда работает в номинальном режиме с максимальной производительностью, то имеется возможность для электрооборудования работать не только на выполнение технологического процесса, но и генерировать реактивную мощность в сеть. Такая возможность много десятилетий используется при эксплуатации синхронных двигателей, способных генерировать реактивную мощность емкостного характера в режиме перевозбуждения в определенных пределах по условиям температурного режима [1, 2].

Применение в частотно-регулируемом приводе преобразователя частоты с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока позволяет снизить затраты промышленных предприятий, благодаря компенсации реактивной мощности на месте потребления.

Применение в двухзвенном преобразователе частоты управляемого выпрямителя в сочетании с автономным инвертором тока позволяет реализовать работу электропривода во всех возможных режимах с рекуперацией в сеть энергии торможения [3]. Это важно не только для электроприводов подъемно-транспортных механизмов, но для любых электроприводов, когда частота использования тормозных режимов двигателя с учетом его номинальной мощности достигает значения, экономически оправдывающего усложнение схемы.

Питание асинхронного двигателя от преобразователя частоты, в частности двухзвенного, открывает возможности не только регулирования производительности машины, но и одновременной компенсации реактивной мощности в питающей сети [4].

В реальных условиях при применении бестрансформаторных схем выпрямителей на входе преобразователя частоты при использовании асинхронного двигателя на 380/220 В возможны два варианта для практической реализации рассматриваемой схемы [5].

Первый вариант характеризует режимы работы преобразователей частоты при питании от сети 380 В и при соединении обмоток статора двигателя в звезду.

В зависимости от угла управления компенсационным преобразователем  $\alpha$  результаты расчетов в относительных единицах представлены графиками на рис. 1, где показаны: потребляемая активная мощность  $P_{дв}/P_{ном}$ ; генерируемая реактивная мощность емкостного характера  $Q_{с(зв)} = f(\sin \alpha)$ ; угол управления  $\alpha$ .

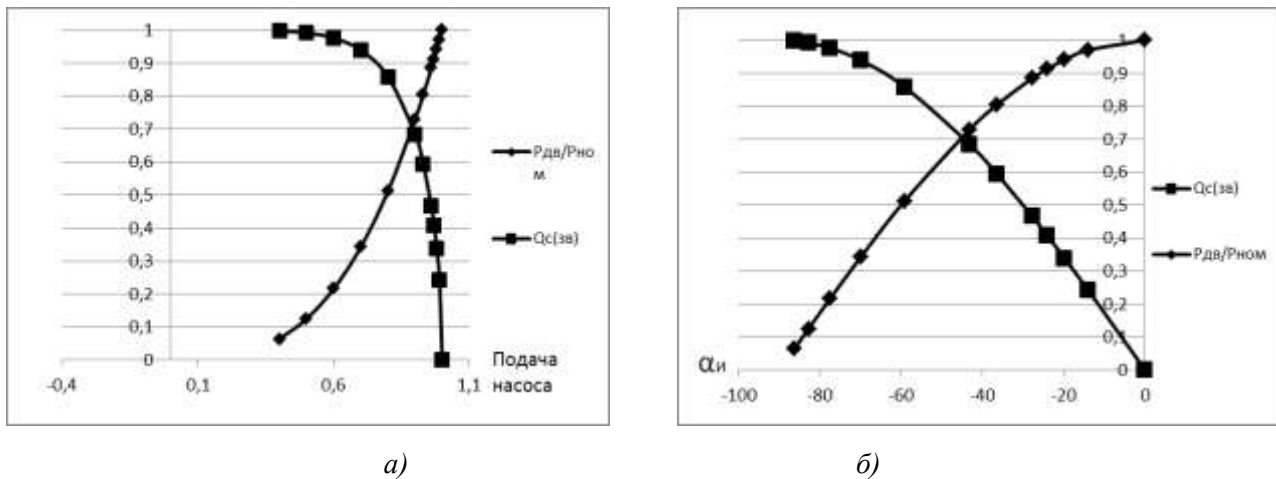


Рис. 1. Характеристики работы привода (а) и компенсационного преобразователя (б) при включении обмоток двигателя в «звезду»

При нулевом значении угла управления  $\alpha$  потребляемая активная мощность равна максимальному значению, а реактивная мощность равна нулю. Характерной особенностью таких выпрямителей является резкое возрастание углов управления при уменьшении нагрузки на двигатель. Так, при снижении нагрузки от полной (в относительных единицах это 1,0) до 0,9 потребляемая двигателем мощность снижается до уровня 0,729, а генерируемая реактивная мощность возрастает с нуля до 0,682 от полной мощности активного компенсационного выпрямителя. Начиная с 70% режима загрузки и менее, реактивная мощность превышает уровень 0,9 от полной мощности выпрямителя  $S_p$ .

Во втором варианте напряжение питающей сети 380 В, обмотки двигателя соединены в «треугольник» –  $U_{л} = 220$  В.

В таком режиме среднее значение на выходе выпрямителя будет  $U_{d0} = 500$  В, а для обеспечения максимального значения напряжения на инверторе для формирования наибольшего действующего значения переменного тока 220 В потребуется выпрямленное напряжение  $U_{d0дв} = 300$  В. В этом случае, чтобы получить начальное напряжение для инвертора 300 В, необходимо установить минимальное значение угла управления  $\alpha_{\min}$ :

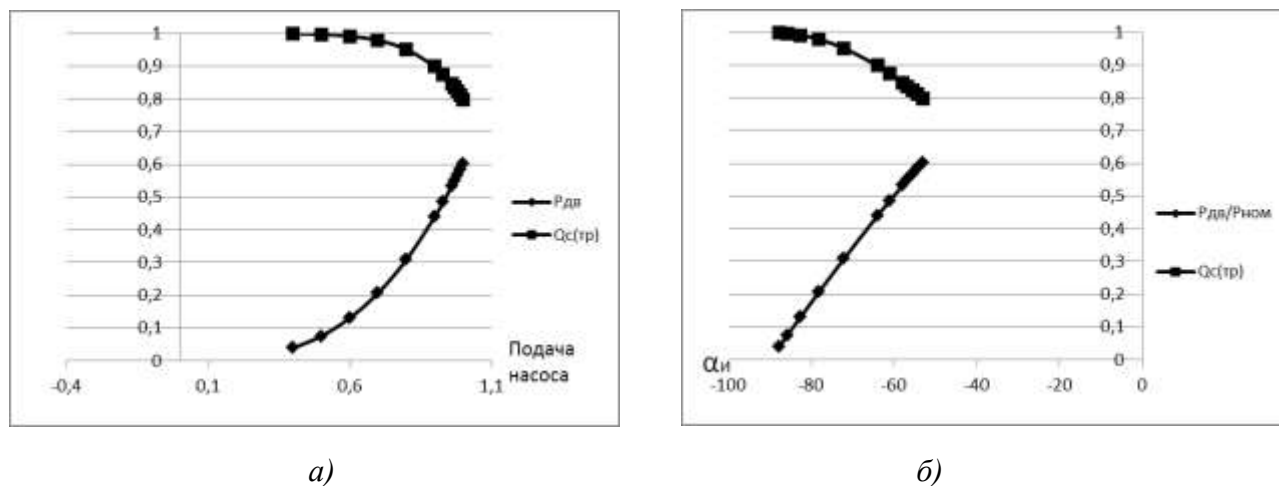
$$\alpha_{\min} = \arccos(U_{d0дв} / U_{d0выпр}), \text{ что соответствует углу } 53 \text{ град. эл.}$$

Так как расчетная мощность выпрямителя получается больше установленной мощности двигателя, определим отношение мощности двигателя к полной мощности выпрямителя:

$$S_{дв.прив} = S_{дв} (U_{d0дв} / U_{d0выпр}). \quad (1)$$

Это означает, что избыточное напряжение  $U_{изб} = 500 - 300 = 200$  В будет затрачиваться на дополнительную генерацию реактивной мощности емкостного характера и последняя будет иметь постоянную составляющую, независимую от загрузки двигателя. С учетом изложенного, на графике рис. 2 приведены результаты пересчета режимов работы двигателя по отношению к полной мощности выпрямителя в системе относительных единиц.

Характерной особенностью этого варианта является то, что при полной нагрузке выпрямитель будет генерировать постоянную составляющую реактивной мощности емкостного характера в  $n = (U_{d0\text{выпр}}/U_{d0\text{дв}})$  раз большую, чем в первом варианте, до момента достижения углом управления значения  $\alpha_{и\text{min}} = \arccos(U_{d0\text{дв}}/U_{d0\text{выпр}})$ . Этот угол соответствует напряжению на входе преобразователя частоты  $U_{d0\text{дв}} = 300\text{В}$ , что позволяет при модуляции получить действующее значение линейного напряжения переменного тока 220 В.



**Рис. 2. Характеристики работы привода (а) и компенсационного преобразователя (б) при соединении обмоток двигателя в «треугольник»**

Зона непостоянства составляющей генерации реактивной мощности  $Qс(тр) = f(\sin \alphaи)$  в этом случае начинается только при угле управления  $\alpha_{и\text{min}} = \arccos(U_{d0\text{дв}}/U_{d0\text{выпр}}) = 53^\circ$ . При этом составляющая реактивной мощности быстро приближается к значению  $(0,98 - 0,99) S_{П}$ .

Возможности структуры, реализованной по второму варианту, целесообразно использованы и в более гибких схмотехнических решениях. Тем более, что включение обмоток двигателя в «треугольник» предполагает соответствующее увеличение номинального тока преобразователя, что позволяет компенсировать реактивную мощность распределительной сети уже не в 1,66 раза, а в три раза большую, чем при действующем значении напряжения на выходе преобразователя частоты для питания двигателя 380 В.

Однако значения одинаковых углов управления вентилями анодной и катодной групп активного компенсационного выпрямителя диктуются механической нагрузкой на электродвигатель, при этом компенсационный преобразователь генерирует реактивную мощность в сеть «по остаточному принципу».

Вместе с тем, уровень генерируемой в распределительную сеть реактивной мощности емкостного характера требует непрерывной коррекции из-за непрерывного изменения нагрузки электроприемников, включенных параллельно на эту сеть, о чем свидетельствует изменение мгновенного значения напряжения в сети.

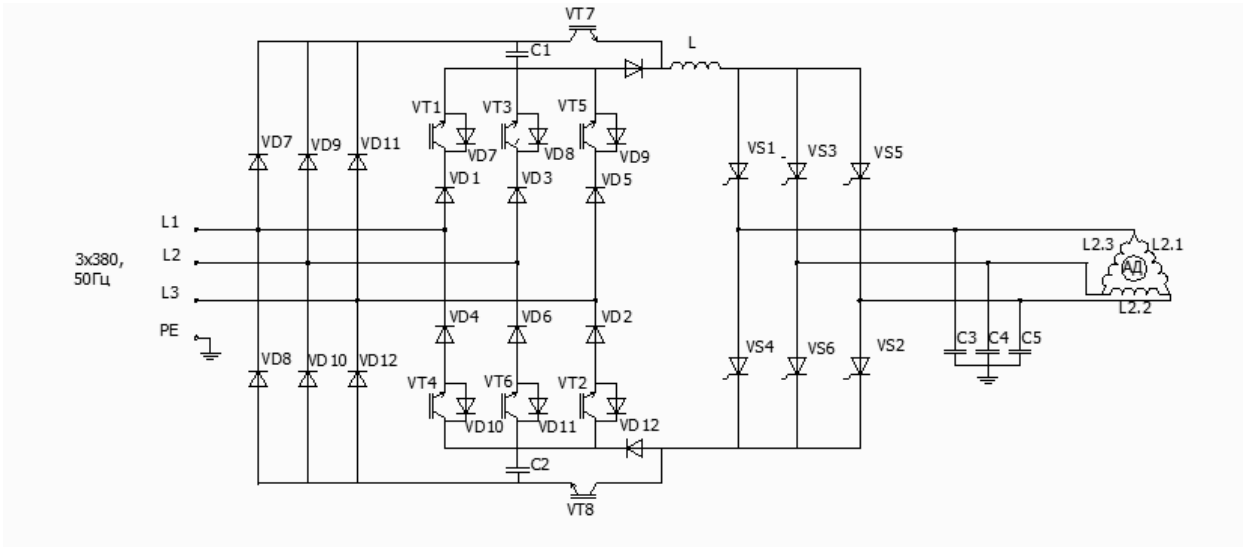
Безусловно, и генерируемая на постоянном уровне реактивная мощность весьма желательна для сокращения технологического расхода электроэнергии, однако обеспечение возможности ее регулирования независимо от технологической нагрузки электропривода с компенсационным преобразователем в функции, например, текущего значения действующего напряжения в сети является актуальной задачей.

Авторами предложены два способа решения этой проблемы [6, 7]:

- использовать раздельное управление углами вентилях групп, работающих при естественной и принудительной коммутации;

- наряду с фазовым регулированием выпрямленного напряжения компенсационного выпрямителя применять регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора тока посредством широтно-импульсной модуляции.

Такие подходы позволяют решать и технологическую задачу, обеспечивая заданные момент и скорость вращения двигателя, и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности в сети. Рассмотрим схему на рис. 3, реализующую первый из них.



**Рис. 3. Схема силовых цепей частотно управляемого асинхронного электропривода с компенсационным выпрямителем и выходным инвертором тока**

Автономный компенсационный выпрямитель (АКВ) позволяет получить выпрямленное напряжение на выходе, потребляя из сети активную и реактивную энергию, которая может иметь индуктивный или емкостной характер в зависимости от углов управления  $\alpha_e$  и  $\alpha_n$ . При этом полагаем, что вентили катодной группы (VT1, VT3, VT5) управляются с углом  $\alpha_n$ , т.е. работают в режиме принудительной коммутации с генерацией реактивной мощности в сеть. А вентили анодной группы (VT4, VT6, VT2) управляются с углом  $\alpha_e$ , потребляя реактивную мощность из сети.

Подобный режим работы выпрямителя наблюдается в полупроводниковом мостовом выпрямителе, который можно рассматривать как последовательное соединение однополупериодных управляемых и неуправляемых выпрямителей. Выпрямленное напряжение неуправляемого выпрямителя постоянно, и оно суммируется с регулируемым напряжением на выходе управляемого выпрямителя. При углах управления, больших  $90^\circ$ , управляемая группа работает в инверторном режиме и передаваемая через диоды мощность возвращается в сеть переменного тока. Электродвижущая сила инвертора направлена навстречу напряжению выпрямителя и уменьшает результирующее напряжение на выходе моста. Теоретически выходное напряжение равно нулю при  $\alpha = 180^\circ$ , что практически недопустимо по условиям коммутации.

Поскольку мостовая схема может быть замещена соединением двух нулевых схем, как показано на рис.4, то действующее значение выпрямленного напряжения может быть представлено как:

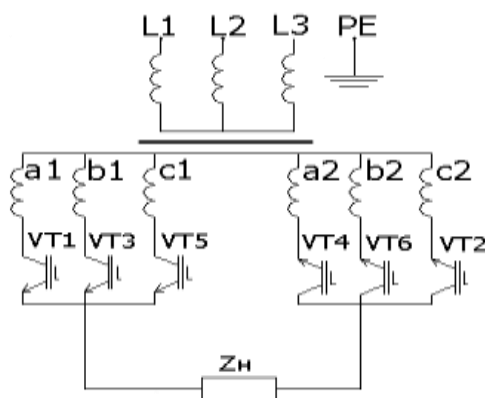
$$U_e = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} U_c \sin \frac{\pi}{6} [\cos \alpha_n + \cos(\gamma - \alpha_e)] \approx \frac{U_{d0}}{2} \cos \alpha_n + \frac{U_{d0}}{2} \cos \alpha_e. \quad (2)$$

С другой стороны, от углов  $\alpha_e$  и  $\alpha_n$  зависит и величина потребляемой активной и реактивной мощности:

$$P_{AKB} = mU I_{I(1)} (\cos \alpha_e + \cos \alpha_n),$$

$$Q_{AKB} = mU I_{I(1)} (\sin \alpha_e + \sin \alpha_n)$$
(3)

Технологическая задача требует заданного значения  $P_{AKB} = f(p_{вент}, q_{вент})$ , где  $p_{вент}, q_{вент}$  - соответственно давление и подача, например, вентилятора. Предложенная схема позволяет обеспечить не только заданное значение активной мощности, но и изменение реактивной мощности, потребляемой из сети или генерируемой в сеть в зависимости от соотношения углов управления вентилями.



**Рис. 4. Схема замещения мостового компенсационного выпрямителя с разделным управлением вентилями катодной и анодной групп**

Таким образом, изменением управления - координаты точки на плоскости в осях  $\alpha_e$  и  $\alpha_n$  - в допустимой для них области можно обеспечить минимально возможное значение циркулирующей в сети реактивной мощности в определенных границах.

Ограничивающим фактором может быть мощность, выделенная для электроустановки или установленная мощность выпрямителя.

Поскольку  $\cos \varphi = \cos(\alpha + \frac{\gamma}{2})$  и полагая  $\frac{\gamma}{2} \approx 0$ , можно считать, что  $\varphi_{(1)} \approx \alpha$ . Тогда реактивная мощность, генерируемая (потребляемая) компенсационным выпрямителем, будет

$$Q_{AKB} = mU I_{I(1)} (\sin \alpha_e + \sin \alpha_n),$$
(4)

где  $\alpha_n < 0$ .

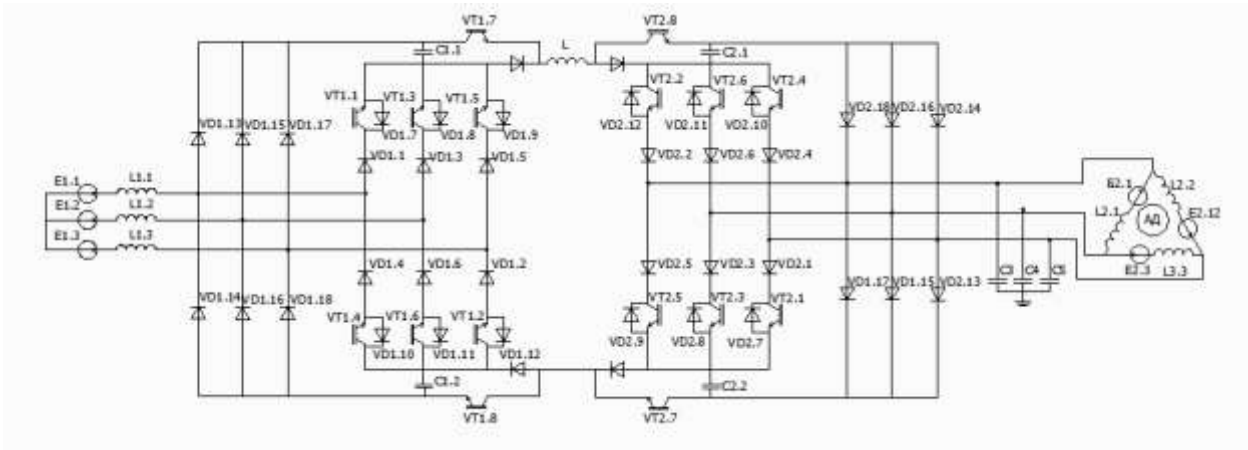
Однако при таком управлении преобразователем проявляется отрицательный фактор - гармоника тока в сети, в том числе и четные. Применение активного фильтра гармоник позволяет улучшить качество электрической энергии [8, 9]. Авторами разработаны практические схемы такого фильтра гармоник на основе релейного регулятора тока, осуществлено исследование на модели свойств и характеристик активного фильтра гармоник, который способен с точностью до 5% компенсировать все гармоники в полосе частот до 2000 Гц.

Использование транзисторов в качестве вентилях в рассматриваемых схемах позволяет реализовать их свойства приборов с непрерывным управлением: в схеме на рис. 4 коммутирующий конденсатор фильтра С1 и С2 может включаться не один раз за период коммутации тока из одной фазы сети в другую, а несколько раз, в целях уменьшения коммутационных перенапряжений на вентиле [10]. В этой связи предложенная авторами схема компенсационного выпрямителя может быть названа активным компенсационным выпрямителем.

Другая возможность - реализация широтно-импульсной модуляции выпрямленного тока при регулировании выходного напряжения на обмотках двигателя, включенного на выходе АИТ. Автономный инвертор тока построен по схеме, аналогичной схеме АКВ (на рис. 5).

В ПЧ на основе инвертора тока выпрямленный ток сохраняет направление во всех режимах работы электропривода. Выпрямленное напряжение изменяется за счет угла фазового управления АКВ. Для снижения скорости электропривода производится снижение  $U_d$ . Для этого в компенсационном выпрямителе увеличивают угол опережения вектора тока по отношению к напряжению на стороне сети. АКВ – преобразователь со стороны сети переходит в режим инвертора, что позволяет рекуперировать энергию в сеть.

Однако главное предназначение схемы АКВ, совмещенного с инвертором тока (ИТ) с ШИМ (рис. 6), состоит в том, что преобразователь на стороне нагрузки, работая в режиме автономного инвертора тока с ШИМ, позволяет в определенных пределах регулировать напряжение на статоре двигателя, независимо от угла управления компенсационным выпрямителем.



**Рис. 5. Схема силовых цепей частотно управляемого асинхронного электропривода с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока и инвертором тока с широтно-импульсной модуляцией**

Указанные пределы зависят от значения необходимой механической мощности на валу двигателя

$$P_M = M(\omega) * \omega, \quad (5)$$

которая в свою очередь обеспечивается необходимым значением тока на входе инвертора тока. Без учета потерь можно считать, что

$$P_M = P_{AKB} = I_d (M(\omega)) * U_{d0} * \cos(\alpha_n) * \gamma, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – степень регулирования напряжения на нагрузке автономного инвертора тока,  $\gamma = U_{m2}/U_d$ . Напряжение на статоре приводного двигателя  $U_{m2}$  формируется на его комплексном сопротивлении при протекании тока по обмоткам статора. Этот ток изменяется под управлением ШИМ, но при этом остается неизменным ток в звене постоянного тока, благодаря специальному алгоритму управления ключами и наличию конденсаторов на выходе инвертора тока с ШИМ [7].

Поэтому реактивная мощность, генерируемая в сеть, при пренебрежении потерями, может быть выражена так:

$$Q_{AKB} = I_d (M(\omega)) * U_{d0} * \sin(\alpha_n). \quad (7)$$

Аналогично приведенной математической формулировке, задача управления рассматриваемым АКВ - ИТ с ШИМ будет следующей: найти оптимальное соотношение между значением угла управления  $\alpha_n$  вентилями компенсационного выпрямителя на стороне сети и степенью широтно-импульсной модуляции тока инвертора  $\gamma$ , доставляющие

$$\min(\operatorname{tg} \varphi_{\text{сети}}) = \min \left( \frac{Q_{\text{сети}} - Q_{AKB}}{P_{AKB}} \right). \quad (8)$$

В современном мире все более возрастает коммерческая значимость технологий. Передача технологий оказывается не менее важной, чем оборот денежных средств, поскольку технологическая невосприимчивость покупателя является главнейшим барьером для продаж высокотехнологичных продуктов и услуг. Даже «сам» бизнес должен знать, что существует лучшее и более дешевое решение. Если это касается электрооборудования, то необходимо демонстрировать его новые функции, как определяющие преимущества в существующем и модернизированном бизнес-процессе. Бизнес-процесс состоит из последовательности операций.

Исследование операций начинается тогда, когда для обоснования решений применяется тот или другой математический аппарат. Под операцией понимается любое мероприятие (система действий), объединённое единым замыслом и направленное к достижению какой-то цели. Операция всегда является управляемым мероприятием, то есть зависит от человека, каким будет выбор определенных решений.

Кроме обоснования самих решений, исследование операций позволяет сравнить возможные варианты (альтернативы) организации операции, оценить возможное влияние на результат отдельных факторов, выявить «узкие места», то есть те элементы системы, нарушение работы которых может особенно сильно сказаться на успехе операции и т. д.

Из определения исследования операций следует, что область их применения столь же широка, как человеческая деятельность. Поэтому не удивительно, что их использование является неотъемлемой частью для таких областей, как экономика, производство, техническая политика предприятий. Благодаря методам исследования операций можно решать такие задачи, как выбор оптимального оборудования для энергетической системы, на основании сравнения и анализа всех альтернативных вариантов изучить влияние замены одного технического устройства на всю систему в целом, а также рассчитать экономические выгоды при использовании различных электро-технологических установок либо при их замене, модернизации.

Технические резервы повышения эффективности эксплуатации электрооборудования разнообразны по своему содержанию, но все они связаны с улучшением надежности, КПД и другими эксплуатационными свойствами электрооборудования. Технологические резервы относятся обычно к основному производству и связаны с разработкой и внедрением новых производственных машин и технологий, обеспечивающих большую степень использования и равномерную загрузку электрооборудования, улучшающих условия эксплуатации и снижающих энергоёмкость производства продукции. Именно к технологическим резервам относят авторы свои предложения.

Для решения ряда задач анализа и планирования производственных процессов авторами предложена модель электрооборудования в виде его производительной функции. Она представляет собой уравнение многофакторной регрессии, описывающее зависимость результата производства от затрат ресурсов. При описании результатов использования электрооборудования с помощью производительной функции эта подсистема рассматривается как «черный ящик», на вход которого поступают ресурсы  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , а на выходе получается результат в виде готовых объемов производства различных видов продукции  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . В качестве ресурсов электрооборудования рассматриваются установленная мощность электрооборудования  $P_n$  и потребляемая из сети активная электроэнергия  $W_p$ , а в качестве результата - валовый выпуск  $X$  продукции, полученной при эксплуатации электрооборудования. Таким образом, процесс потребления и преобразования электроэнергии в электроприборе или электротехнологической установке замещается своей моделью в форме нелинейных производительной функции  $X = F(P_n, P)$ , то есть выпуск есть функция от затрат ресурсов. Оптимизация возможна в том случае, если факторы, влияющие на производственную функцию, могут быть взаимозаменяемыми в некотором диапазоне.

Мультипликативная форма записи производительной функции электрооборудования:

$$X = AP_{\text{уст}}^{\alpha_1} W_n^{\alpha_2}, \quad (9)$$

где  $A$  – коэффициент нейтрального технологического прогресса;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты эластичности по установленной мощности и потребленной энергии,  $\alpha_1 > 0$ ,  $\alpha_2 > 0$ .

Применительно к электротехнологическим производственным процессам производительная функция позволяет судить о возможном росте выпуска продукции, увеличении эффективности технологического процесса при заданных установленных мощностях и известном потреблении энергии.

Обобщенный показатель эффективности есть взвешенное среднее геометрическое частных показателей эффективности: фондоотдачи и производительности потребленной электроэнергии:

$$E = \left( \frac{X}{P_H} \right)^\alpha \left( \frac{X}{W_{\Pi}} \right)^{1-\alpha}. \quad (10)$$

Здесь роль весов выполняют относительные эластичности

$$\alpha = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad 1 - \alpha = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

То есть частные эффективности участвуют в образовании обобщенной эффективности с такими же приоритетами, с какими входят в производительную функцию соответствующие ресурсы.

При применении производительной функции встает вопрос об интерпретации переменных и наполнении модели исходными данными. Мультипликативная производительная функция определяется по временному ряду выпусков и затрат ресурсов  $(X_t, P_{Ht}, W_{\Pi t})$ ,  $t = 1, \dots, T$ , где  $T$  – длина временного ряда, при этом предполагается, что имеет место  $T$  соотношений:

$$X_t = \delta_t A P_{Ht}^{\alpha_1} \cdot W_{\Pi t}^{\alpha_2},$$

где  $\delta_t$  – корректировочный коэффициент, который приводит в соответствие фактический и расчетный выпуск и отражает флюктуацию результата под воздействием других факторов.

В логарифмах эта функция линейна,

$$\ln X_t = \ln A + \alpha_1 \cdot \ln P_{Ht} + \alpha_2 \cdot \ln W_{\Pi t} + \varepsilon_t, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_t = \ln \delta_t$ ,  $M\varepsilon_t = 0$ .

Получаем модель линейной множественной регрессии. Параметры функции  $A$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  могут быть определены по методу наименьших квадратов с помощью стандартных пакетов прикладных программ, содержащих метод множественной регрессии.

Математические модели, применяемые в настоящее время в задачах исследования операций, подразделяются на аналитические и статистические. В аналитических моделях при принятых упрощениях и допущениях составляются те или иные аналитические зависимости между переменными решаемой задачи. С помощью аналитических моделей удастся с удовлетворительной точностью описать лишь сравнительно простые операции, где число переменных не слишком велико. В статистических моделях сама операция как бы «копируется» на вычислительной машине со всеми случайными изменениями. Статистические модели позволяют учесть большее число факторов, нежели аналитические, и не требуют грубых упрощений и допущений. Однако результаты такого анализа, естественно, труднее поддаются анализу и осмыслению.

Авторы полагают, что демонстрации бизнесу возможностей имеющихся технических решений наиболее перспективно использование совместно аналитической и статистической моделей для одной и той же задачи, так как аналитическая модель позволяет разобраться в



основных закономерностях явлений, а дальнейшее уточнение можно получить статистическим моделированием. Авторами накоплена большая библиотека дескриптивных и имитационных динамических моделей для изучения внутрисистемных статистических операций.

Внутрисистемный статистический анализ базируется на использовании статистических экспериментальных табличных данных. Каждая система характеризуется балансом. Бесперебойная работа электроприемников (электрооборудования) возможна только при балансе расчетов электропотребителей с энергосистемой и другими контрагентами за все затраты и работы.

Ответить на вопросы, каким должно быть потребление энергии из сети для обеспечения необходимого количества энергии для реализации технологического процесса и какие количества энергии, потребленной из сети на обеспечение заданной технологической переменной, «потребляются» другими технологическими потребителями, то есть каково распределение энергии на технологические переменные, сопутствующие данному процессу и взаимосвязанные с ним, позволяют результаты анализа балансовой модели [11].

Сущность балансовой модели можно определить как определение итоговых затрат энергии по заданному количеству энергии на обеспечение технологического процесса на основе данных о технологических возможностях, отраженных в коэффициентах прямых функциональных затрат. Разумеется, по этим же зависимостям может быть решена и обратная задача. В основе балансовой модели лежит матрица, представляющая (обычно в стоимостной форме) все связи между блоками оборудования, производственными подсистемами.

Энергетические связи между выбранными переменными состояниями, результатами технологического процесса и окружающей систему электрооборудования средой в производственном процессе и при распределении энергии или результатов технологического процесса представляются в энергетическом выражении с помощью таблицы энергетического баланса (ТЭБ). Структура таблицы, приведенной на рис. 7, отражает все показатели энергетических взаимосвязей в производственном процессе и при распределении энергии или результатов технологического процесса за единичный производственный цикл.

Технологические процессы (переменные состояния)		Переменные расплачиваемые за электроэнергию									Конечное использование энергии, Y <sub>i</sub>	Потребленное значение энергии, X <sub>i</sub>	
		сеть	система управления				электродвигатель						
			задающее устройство	управляю- щее устройст- во	преобразо- ватель	датчики обратной связи	ротор двигател- я	ЭМП	передаточ- ное устройст- во	рабочий механизм			
переменные, потребляющие энергию	сеть	a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17	a18	a19	Y1	X1	
	система управления	задающее устройство	a21	a22	a23	a24	a25	a26	a27	a28	a29	Y2	X2
		управляющее устройство	a31	a32	a33	a34	a35	a36	a37	a38	a39	Y3	X3
		преобразователь	a41	a42	a43	a44	a45	a46	a47	a48	a49	Y4	X4
		дос	a51	a52	a53	a54	a55	a56	a57	a58	a59	Y5	X5
		электродвигатель	ротор двигателя	a61	a62	a63	a64	a65	a66	a67	a68	a69	Y6
	ЭМП		a71	a72	a73	a74	a75	a76	a77	a78	a79	Y7	X7
	передаточное устройство	передаточное устройство	a81	a82	a83	a84	a85	a86	a87	a88	a89	Y8	X8
		рабочий механизм	a91	a92	a93	a94	a95	a96	a97	a98	a99	Y9	X9
Компенсация за обслуживание электрооборудования, L		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9			
Компенсация капиталовложений в инфраструктуру, A		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9			
Энергия в результирующем продукте, O		O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9			
Сумма калькуляций для субагентов, X'		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9			

Рис. 6. Таблица энергетического баланса производственной технологической установки с электроприводом

## Выводы

1. Применение в частотно-регулируемом приводе преобразователя частоты на основе автономного инвертора тока с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока позволяет снизить затраты промышленных предприятий благодаря компенсации реактивной мощности в узле нагрузки. Реализована схема активного компенсационного выпрямителя, в которой искусственная коммутация вентиляей осуществляется посредством использования свойств полностью управляемых полупроводниковых приборов.

2. В реальных условиях применения бестрансформаторных схем выпрямителей с напряжением питающей сети 380 В обмотки двигателя на выходе инвертора тока предлагается соединять в «треугольник». При этом избыточное напряжение будет затрачиваться на дополнительную генерацию реактивной мощности, которая увеличится в 1,66 раза и будет иметь постоянную составляющую, практически независимую от технологической загрузки двигателя. При этом увеличение номинального тока компенсационного выпрямителя во столько же раз увеличивает диапазон компенсируемой реактивной мощности.

3. Рассмотрена возможность регулирования генерируемой реактивной мощности независимо от технологической нагрузки электропривода. Для решения данной комплексной задачи предложены способы оптимального управления активным компенсационным выпрямителем с отдельным управлением группами вентиляей, а также оптимизации соотношения угла управления компенсационным выпрямителем и степенью широтно-импульсного регулирования выходных переменных автономного инвертора тока.

4. Для решения ряда задач анализа и планирования производственных процессов авторами предложена модель электрооборудования в виде его производительной функции. Применение балансовой модели позволяет осуществить оценку величины итоговых затрат на обеспечение технологического процесса по заданному количеству энергии, на основе данных о технологических возможностях, отраженных в коэффициентах прямых функциональных затрат, свойственных рассматриваемой технологии потребления электроэнергии.

## Библиографический список

1. **Титов, В.Г.** Анализ использования синхронных двигателей в качестве компенсаторов реактивной мощности / В.Г. Титов, А.С. Плехов // Электрооборудование промышленных установок: труды Нижегородского государственного технического университета / НГТУ. – Нижний Новгород, 2005. С. 111–113.
2. **Охотников, М.Н.** Оптимизация электропотребления посредством управления возбуждением группы синхронных двигателей / А.С. Плехов, В.Г. Титов, М.Н. Охотников // V Международная (XVI Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. – СПб., 2007. С. 47–51.
3. Электрооборудование грузоподъемных кранов: учеб. пособие / Е.М. Певзнер [и др.]; под ред. Г.Б. Онищенко. – М.: Россельхозакадемия, 2009. – 360 с.
4. **Плехов, А.С.** Средства компенсации реактивной мощности общепромышленных систем электроэнергетики / А.С. Плехов, А.И. Зайцев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. № 3. С. 36–38.
5. **Плехов, А.С.** Техничко-экономические показатели применения энергосберегающих компенсационных выпрямителей для питания регулируемых электроприводов / А.И. Зайцев, А.С. Плехов // Электротехнические комплексы и системы управления. – Воронеж, 2009. №4(16). С. 19–25.
6. **Титов, В.Г.** Комплексный подход к электропотреблению мощных электроприводов / А.С. Плехов, В.Г. Титов // Приводная техника. 2010. № 2. С. 10–16.
7. **Плехов, А.С.** Возможности применения компенсационных преобразователей в звене постоянного тока электроприводов на основе автономного инвертора тока / А.И. Зайцев, А.С. Плехов, В.Г. Титов // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 4. С. 23–35.

8. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
9. **Плехов, А.С.** Силовая промышленная электроника: учеб. пособие / А.И. Зайцев, А.С. Плехов. – Воронеж: Научная книга, 2008. – 252 с.
10. Пат. Полупроводниковый компенсатор реактивной мощности / Зайцев А.И., Плехов А.С. № 78018; 2008, Бюл. № 31.
11. **Плехов, А.С.** Линейная модель энергетического баланса системы электрооборудования // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Нижний Новгород, 2007. С. 50–53.

*Дата поступления  
в редакцию 01.02.2011*

**A.S. Plehov, M.N. Ohotnikov, V.G. Titov**

### **TECHNOLOGY ECONOMY OF ELECTRIC POWER IN THE ELECTRIC DRIVE**

On examples of use of the compensatory rectifier in a direct current link it is frequency the operated electric drive complex technical decisions for the industry and housing and communal services enterprises are discussed. For demonstration and an estimation of predicted results of innovations in the specified subject domain the information approach on the basis of descriptive modeling of processes of the manufacture using offered power economy up systems of an electric equipment is offered.

*Key words:* frequency the operated electric drive, a direct current link, the reactive power, indemnification of the reactive power, the compensatory rectifier, separate management of groups of gates, the independent inverter of a current, pulse-width management, productive function of an electric equipment, balance model of an electric equipment.